

# 多层次生物操纵技术在人工湿地控制蓝藻的应用研究

李燕萍<sup>1</sup>, 夏晴晴<sup>2\*</sup>, 程花<sup>2</sup>, 赵珏<sup>2</sup>

(1. 江苏环科检测有限公司, 江苏无锡 214061; 2. 江苏江达生态科技有限公司, 江苏无锡 214061)

**摘要** 通过野外围隔试验建立多层次高效生物食物链调控水质和消除蓝藻, 寻找出合理的控藻生物比例。再将该技术应用到贡湖湾人工湿地, 探索多层次生物操纵技术+人工湿地技术控制蓝藻的效率。结果表明, 当控藻生物鲢鱼、铜锈环棱螺、褶纹冠蚌、河蚬的比例为4:5:20:40时, 30 d后叶绿素a消除率达到97.12%, 水体营养盐TN、TP和NH<sub>3</sub>-N浓度分别下降了73.63%、57.44%和74.44%, 说明合理的多层级控藻生物比例对水体中营养盐和藻类均有显著的消除作用。该控藻生物比例应用到贡湖湾人工湿地试验12 d后, 蓝藻消除效率达到99.8%, 试验14 d后蓝藻生物量比人工湿地原有蓝藻量降低6.1%, 说明利用“多层次生物操纵技术+人工湿地技术”结合的方法能有效控制蓝藻, 为解决贡湖湖滨带内蓝藻提供了一种安全有效的手段。

**关键词** 控藻生物; 围隔试验; 人工湿地技术; 蓝藻

**中图分类号** S181.3 **文献标识码** A

**文章编号** 0517-6611(2019)15-0081-04

**doi**: 10.3969/j.issn.0517-6611.2019.15.023



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

## Application Research of Multi-layer Biological Control Technology in Controlling Cyanobacteria in Constructed Wetlands

LI Yan-ping<sup>1</sup>, XIA Qing-qing<sup>2</sup>, CHENG Hua<sup>2</sup> et al (1. Jiangsu Huanke Testing Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu 214061; 2. Jiangsu Jianda Ecological Technology Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu 214061)

**Abstract** Through field enclosure experiments, a multi-level high-efficiency biological food chain was established to regulate water quality and eliminate *Cyanobacteria*, and a reasonable proportion of algae-controlling organisms was found. Then, this method was applied to the constructed wetland of Gonghu Bay to explore the efficiency of controlling *Cyanobacteria* by multi-level biological manipulation technology and constructed wetland technology. The results showed that when the proportion of *Hypophthalmichthys molitrix*, *Bellamyia aeruginosa*, *Cristaria plicata* and *Corbicula fluminea* was 4:5:20:40, the chlorophyll a elimination rate reached 97.12% after 30 days, and the water nutrient salt TN, TP The concentration of NH<sub>3</sub>-N decreased by 73.63%, 57.44% and 74.44%, respectively, indicating that the proportion of rational multi-level algae control organisms could significantly eliminated nutrients and algae in water. After 12 days of application of this algae-controlling organism to the constructed wetland of Gonghu Bay, the *Cyanobacteria* elimination efficiency reached 99.8%. After 14 days, the *Cyanobacteria* biomass decreased by 6.1% compared with the original quantity of the constructed wetland. It showed that the combination of multi-level biological manipulation technology and constructed wetland technology could effectively control *Cyanobacteria* and provide a safe and effective means for solving *Cyanobacteria* in the lakeside zone of Gonghu Lake.

**Key words** Algae-controlling organisms; Enclosure experiments; Constructed wetland technology; *Cyanobacteria*

贡湖是太湖的重要组成部分, 在太湖的东北部, 处于夏季偏南风为主导风向的下风区。近年来, 受太湖富营养化、蓝藻水华<sup>[1]</sup>的影响, 湖滨带内有大量蓝藻堆积, 难以清除, 导致湖滨带水质恶化, 水生生物死亡, 生态系统受到严重破坏<sup>[2-3]</sup>。针对贡湖湖滨带内蓝藻堆积严重的问题, 目前多采取蓝藻拦截<sup>[4]</sup>、人工打捞或者化学药剂应急除藻的方法。而这些物理和化学<sup>[5-6]</sup>手段不但不能从根本上达到治理水体富营养化的目的, 而且劳动负荷高、会对水体造成二次污染。为此, 采取安全有效、从根本上防治水体富营养化的生物调控措施十分必要<sup>[7]</sup>。大量探索和实践表明, 生物操纵技术<sup>[8-9]</sup>、人工湿地技术<sup>[10-11]</sup>在控制藻类、改善水质和生态环境方面取得了较好效果。该研究基于生物操纵理论提出利用多层次高效生物食物链调控水质和消除蓝藻, 筛选合理的控藻生物比例, 并将该技术应用到贡湖湾人工湿地区(位于贡湖东北岸), 结合人工湿地的特征, 形成“生物操纵技术+人工湿地技术”有机结合的方法来控制蓝藻, 为有效改善太湖水质、增加水体透明度以及早日实现湖滨带的生态系统恢复

提供有利手段。

## 1 材料与方法

### 1.1 多层次生物操纵野外试验材料与方法

(1) 野外试验材料。①控藻生物。鲢鱼、铜锈环棱螺、河蚬、褶纹冠蚌, 建立多层次的高效控藻食物链。②野外试验围隔。围隔设在贡湖湾小溪港小模型内, 将小模型内原有水体抽出, 从外太湖抽入带有藻类水体; 在小模型内用不透水的聚乙烯材料、木桩制成1个对照组围隔和9个试验组围隔, 共10个围隔, 围隔大小2.0 m×1.5 m, 水深1.5 m。

(2) 试验方法。野外试验时期为8月, 水温为25~30℃, 水位基本稳定。该研究设计围隔内藻类平均密度为8 900万个/L, 利用4种控藻生物(因素A~D)、3个不同密度水平(水平1~3)进行正交试验。根据正交试验组合, 分别向1~9#围隔内投放不同密度的4种控藻生物, 其中采用网袋和浮球挂养河蚌; 0#围隔为对照组不投放控藻生物。4种控藻生物不同水平密度设计见表1。0~9#围隔正交试验组合分别为: 对照组、A<sub>1</sub>B<sub>1</sub>C<sub>1</sub>D<sub>1</sub>、A<sub>1</sub>B<sub>2</sub>C<sub>2</sub>D<sub>2</sub>、A<sub>1</sub>B<sub>3</sub>C<sub>3</sub>D<sub>3</sub>、A<sub>2</sub>B<sub>1</sub>C<sub>2</sub>D<sub>3</sub>、A<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C<sub>3</sub>D<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>B<sub>3</sub>C<sub>1</sub>D<sub>2</sub>、A<sub>3</sub>B<sub>1</sub>C<sub>3</sub>D<sub>2</sub>、A<sub>3</sub>B<sub>2</sub>C<sub>1</sub>D<sub>3</sub>、A<sub>3</sub>B<sub>3</sub>C<sub>2</sub>D<sub>1</sub>。

### 1.2 控藻生物在人工湿地控制蓝藻试验材料与方法。

(1) 试验材料。①控藻生物。鲢鱼、铜锈环棱螺、褶纹冠蚌、河蚬。②人工湿地试验区。选择在贡湖湾人工湿地与外太湖连接处7#桥北侧; 试验区内布设围隔, 面积为600 m<sup>2</sup>。

**基金项目** 江苏省政策引导类计划(国际科技合作)——重点国别及机构产业技术合作项目(BZ2017004)。

**作者简介** 李燕萍(1980—), 女, 江苏无锡人, 硕士, 工程师, 从事环境监测与分析工作。\*通信作者, 硕士, 工程师, 从事水生态修复与治理研究。

**收稿日期** 2019-02-25

表1 4种控藻生物的不同密度水平

Table 1 Different density levels of four algae-controlling organisms

密度水平 Density level	g/m <sup>2</sup>			
	鲢鱼 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i> (A)	铜锈环棱螺 <i>Bellamya aeruginosa</i> (B)	褶纹冠蚌 <i>Cristaria plicata</i> (C)	河蚬 <i>Corbicula fluminea</i> (D)
水平1 Level 1	20	50	100	100
水平2 Level 2	40	100	200	200
水平3 Level 3	80	200	400	400

(2)方法。试验时期为6月,水温19~27℃,水位基本保持不变。打开7#桥闸门,从外太湖灌入蓝藻到围隔内,蓝藻平均密度12 800万个/L,按照鱼:螺:蚌:蚬=4:5:20:40比例投放控藻生物。试验周期为2周,试验区布设6个监测点位,每2 d监测一次蓝藻密度,通过测定试验前后人工湿地试验区内蓝藻密度变化,研究多层次生物操纵技术在人工湿地技术协同作用下消除蓝藻的效率。

### 1.3 水样采集与分析

(1)水质参数。该次试验水质参数中氨氮、总磷、总氮、温度等的测定采用《水和废水分析监测方法(第四版)》中所规定的国家标准分析方法。

(2)叶绿素a浓度。采用三波长测定法测定<sup>[12]</sup>。即在一定压力下,用醋酸纤维酯微孔滤膜(孔径为0.45 μm)对一定体积的藻液进行过滤,然后将滤膜放入10 mL离心管中,加入90%的丙酮10 mL,用涡旋混合仪使其充分振荡,放置冰箱内提取24 h,然后置于冰冻离心机上4 500 r/min离心10 min,移取上清液于1 cm比色皿中,用分光光度计测定750、663、645和630 nm处的吸光度,以90%丙酮溶液作为参比,按公式得出叶绿素a含量。

(3)藻密度。计数方法采用显微镜法<sup>[13]</sup>,计数不同类型细胞群体数量和群体大小。浮游植物数量计算公式为 $N=A \times V_s \times n / A_c \times V_a$ 。其中, $N$ 为每升原水样中的浮游植物数量(个/L); $A$ 为计数框面积(mm<sup>2</sup>),一个视野的实际面积为0.196 349 mm<sup>2</sup>; $V_s$ 为1升原水样沉淀浓缩后的体积(mL); $n$ 为计数所得浮游植物的数目; $A_c$ 为计数面积(mm<sup>2</sup>); $V_a$ 为计数框的体积(mL);标准情况下 $V_a$ 为0.1 mL, $V_s$ 通常为100 mL, $A$ 为400 mm<sup>2</sup>。

(4)叶绿素a消除率。计算公式为:叶绿素a消除率= $(C_0 - C_t) / C_0 \times 100\%$ ,式中, $C_0$ 代表试验时间为 $t$ 时对照组中叶绿素a的浓度(μg/L)、 $C_t$ 代表试验时间为 $t$ 时试验组中叶绿素a的浓度(μg/L)。

(5)藻类消除率。计算公式为:藻类消除率= $(D_0 - D_t) / D_0 \times 100\%$ 。式中, $D_0$ 为藻类初始密度(万个/L)、 $D_t$ 代表试验时间为 $t$ 时试验组中藻类密度(万个/L)。

## 2 结果与分析

### 2.1 多层次生物操纵技术对围隔水体蓝藻的消除作用

由图1和表2分析可知,试验期间对照组叶绿素a浓度变化范围为250~330 μg/L,试验组叶绿素a浓度较对照组都有明显的消减,尤其是4#试验组叶绿素a浓度降低变化显著,

30 d后叶绿素a含量消除率达到97.12%。混养贝类(螺、蚌、河蚬)和鱼类形成多层级的滤食藻类生物群落,协同作用有效抑制水体藻类浓度,合理的控藻生物比例(鱼:螺:蚌:蚬=4:5:20:40)对藻类的去除效率最显著,在该试验条件下基本能消除围隔内的藻类。而贝类和鱼类密度过高或比例不合理时,加剧种内竞争,导致藻类的摄食受到影响,降低对藻类的去除效率。

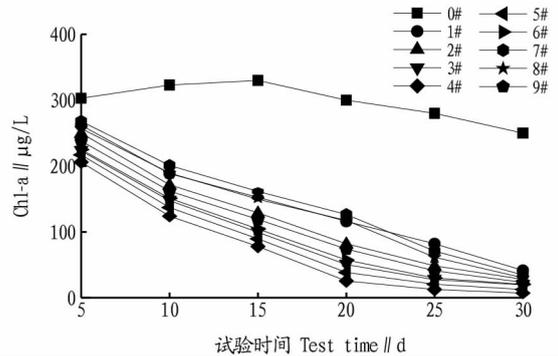


图1 不同试验组围隔内水体叶绿素a浓度变化趋势

Fig. 1 Trend of chlorophyll a concentration in the enclosure of different test groups

表2 不同试验组围隔内水体叶绿素a含量消除率

Table 2 Elimination rate of chlorophyll a content of different test groups

试验组编号 Test group number	叶绿素a含量消除率 Elimination rate of chlorophyll a content//%					
	5 d	10 d	15 d	20 d	25 d	30 d
1#	13.53	41.64	53.79	61.33	70.71	83.40
2#	17.49	46.90	60.91	72.67	82.68	88.80
3#	26.40	54.33	69.85	83.17	90.21	92.16
4#	32.01	61.61	76.36	91.50	95.50	97.12
5#	28.38	57.59	72.88	87.17	92.68	94.92
6#	25.74	53.25	68.33	80.83	89.29	91.84
7#	11.55	37.77	51.06	57.83	74.64	86.12
8#	15.18	41.33	54.70	60.83	78.04	87.84
9#	21.45	49.85	63.94	75.33	85.36	90.68

### 2.2 多层次生物操纵技术对围隔水体营养盐的影响

不同试验时间内水体营养盐浓度变化见图2~7。由图2~7分析可知,空白对照组以及不同试验组中氮、磷营养盐浓度均有不同程度下降,且试验组4#对水体中氮、磷营养盐消除作用显著,试验30 d后水体营养盐TN、TP和NH<sub>3</sub>-N浓度分别下降了73.63%、57.44%和74.44%,这是因为水中氮、磷等营养盐被浮游藻类吸收利用,贝类和鱼类通过摄食作用将藻体中氮、磷营养盐向水底层转移,从而有效降低水体中营养盐浓度,达到了调控水质的目的。而其他试验组对水体中氮、磷营养盐消除速率逐渐降低,这可能与不合理比例控藻生物种内竞争增大,对藻类的摄食作用下降有关,也可能与高密度底栖贝类的排泄物增多以及生物扰动作用增强有关。Li等<sup>[14]</sup>研究证实了高密度底层的贝类排泄物增加了水体氮磷营养负荷;陈聚法等<sup>[15]</sup>研究证实了贝类的生物扰动作用对底质营养盐有明显的促释放作用。

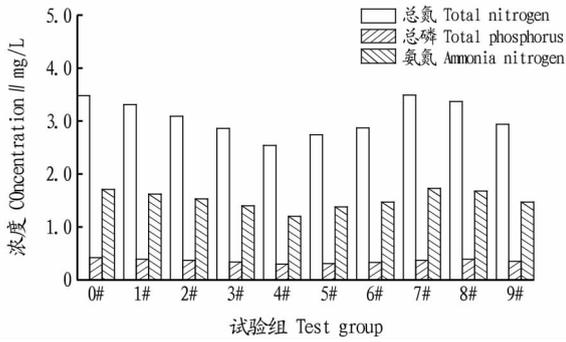


图2 第5天不同试验组中水体内营养盐浓度变化

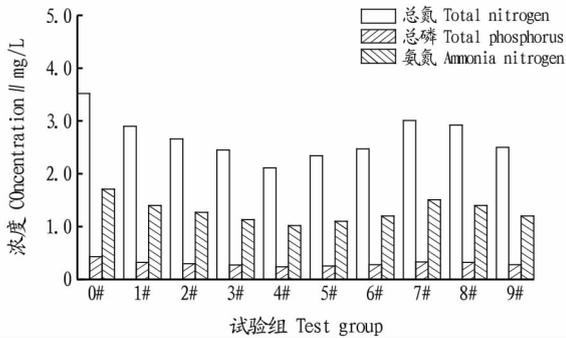
Fig. 2 Changes of nutrient concentration in water of different test groups on the 5<sup>th</sup> day

图3 第10天不同试验组中水体内营养盐浓度变化

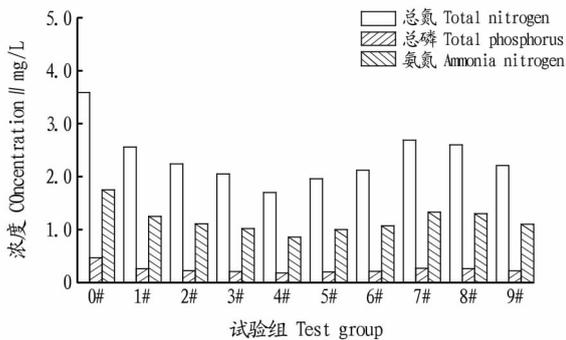
Fig. 3 Changes of nutrient concentration in water of different test groups on the 10<sup>th</sup> day

图4 第15天不同试验组中水体内营养盐浓度变化

Fig. 4 Changes of nutrient concentration in water of different test groups on the 15<sup>th</sup> day

**2.3 多层次生物操纵技术在人工湿地控制蓝藻中的应用** 由表3分析可知,投放控藻生物后,人工湿地试验区内蓝藻密度发生了显著变化,蓝藻密度均逐渐降低。试验12 d后蓝藻密度基本恢复到未灌入蓝藻前(试验前),蓝藻消除效率达到99.8%;试验14 d后蓝藻密度降低至18.6万个/L,比原人工湿地内蓝藻平均密度(19.8万个/L)下降了6.1%,蓝藻得到全部消除并同时消除了人工湿地区内原有的少量蓝藻。由此可见,多层次高效生物操纵技术在人工湿地内能有效控制和消除蓝藻,比单一控藻生物的消除效率高<sup>[16-17]</sup>;并且比小围隔内蓝藻消除速率高,这是因为人工湿地内粗砾石等基质对磷具有吸附和过滤作用、大量沉水植物能够吸收水

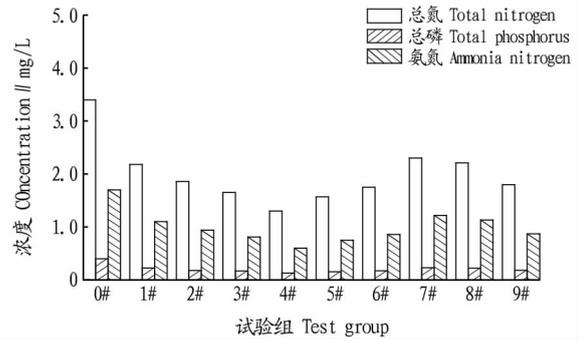


图5 第20天不同试验组中水体内营养盐浓度变化

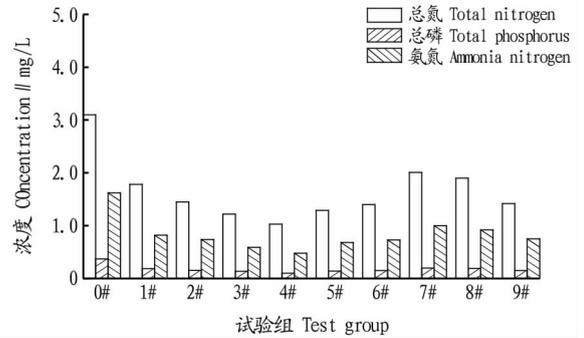
Fig. 5 Changes of nutrient concentration in water of different test groups on the 20<sup>th</sup> day

图6 第25天不同试验组中水体内营养盐浓度变化

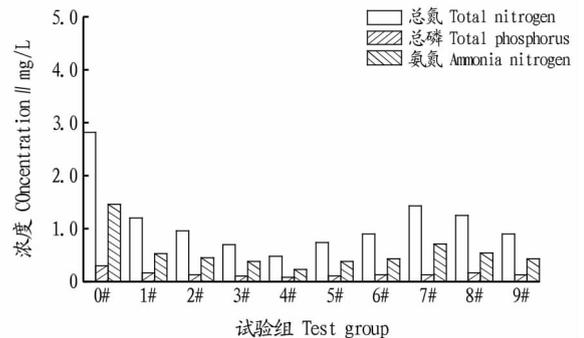
Fig. 6 Changes of nutrient concentration in water of different test groups on the 25<sup>th</sup> day

图7 第30天不同试验组中水体内营养盐浓度变化

Fig. 7 Changes of nutrient concentration in water of different test groups on the 30<sup>th</sup> day

体内的氮、磷<sup>[18-20]</sup>,进而加快对蓝藻的消除作用。该多层次生物操纵技术增强了湿地的生态功能,与贡湖湾人工湿地技术协同作用可实现对太湖蓝藻水华的控制和消除。

#### 4 结论

(1)野外小围隔试验控藻生物鲢鱼、铜锈环棱螺、褶纹冠蚌、河蚬的比例为4:5:20:40时,30 d后叶绿素a消除率达到97.12%,水体营养盐TN、TP和NH<sub>3</sub>-N浓度分别下降了73.63%、57.44%和74.44%,说明合理比例的多层级控藻生物能够有效调控水质和消除蓝藻。

(2)合理比例的控藻生物应用到贡湖湾人工湿地试验12 d后,蓝藻消除效率达到99.8%,试验14 d后蓝藻生物量比人工湿地原有蓝藻量降低6.1%,多层次生物操纵技术在

人工湿地技术协同作用下能有效控制和消除蓝藻。

表3 贡湖湾人工湿地地区蓝藻生物量消除率

Table 3 Biomass elimination rate of *Cyanobacteria* in Gonghu Bay constructed wetland

试验时间 Test time d	蓝藻密度 <i>Cyanobacteria</i> density 万个/L	消除率 Elimination rate//%
0	12 800.0	-
2	10 490.0	18.0
4	5 200.0	59.4
6	2 745.0	78.6
8	936.0	92.7
10	220.0	98.3
12	20.0	99.8
14	18.6	99.8

注:原人工湿地蓝藻密度为19.8万个/L

Note:The density of *Cyanobacteria* in the original constructed wetland was 198 000 per liter

(3) 多层次生物操纵技术增强了人工湿地的生态功能,结合人工湿地的特征,形成“生物操纵技术+人工湿地技术”有机结合的方法来控制蓝藻,为解决贡湖湖滨带内蓝藻提供了一种安全有效的手段。

#### 参考文献

- [1] 秦伯强,胡维平,陈伟民,等.太湖水环境演化过程与机理[M].北京:科学出版社,2004.
- [2] BURKERT U, HYENSTRAND D, DRAKARE S, et al. Effects of the mixotrophic flagellate *Ochromonas* sp. on colony formation in *Microcystis aeruginosa*[J]. *Aquatic ecology*, 2001, 35(1): 9-17.
- [3] QIN B Q, XU P Z, WU Q L, et al. Environmental issues of Lake Taihu, China[J]. *Hydrobiology*, 2007, 581(1): 3-14.
- [9] 谢晴,张静,麻泽龙,等. A<sup>2</sup>/O-MBR 工艺在农村生活污水处理中的示范[J]. *环境工程*, 2016, 34(7): 38-41, 87.
- [10] 李松,单胜道,曾林慧,等. 人工湿地/稳定塘工艺处理农村生活污水[J]. *中国给水排水*, 2008, 24(10): 67-69.
- [11] 蒋跃,韩姗姗,徐春燕. 生态浮床与潜流湿地组合工艺对生活污水净

- [4] 李敦海,汪志聪,秦红杰,等. 蓝藻水华的拦截和陷阱捕获综合控藻技术研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(Z2): 45-50.
- [5] CHEN S Y, WU Z M, YU W B, et al. Formation, harmfulness, prevention, control and treatment of waters eutrophication[J]. *Environ Sci Technol*, 1992(2): 11-15.
- [6] 武燕杰,万红友,阙灵佳. 湖泊富营养化的生物修复及其展望[J]. *环保科技*, 2008, 14(1): 45-48.
- [7] CHAPIN F S, BRAIN H W, RICHARD J H. Biotic control over the function of ecosystems[J]. *Science*, 1997, 277: 500-504.
- [8] 此里能布,毛建忠,黄少峰. 经典与非经典生物操纵理论及其应用[J]. *生态科学*, 2012, 31(1): 86-90.
- [9] 贾柏樱,马华. 生物操纵技术控制原水藻类的应用研究[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(9): 11-15.
- [10] 王平,周少奇. 人工湿地研究进展及应用[J]. *生态科学*, 2005, 24(3): 278-281.
- [11] LIN Y F, JING S R, LEE D Y, et al. Nutrient removal from aquaculture wastewater using a constructed wetlands system[J]. *Aquaculture*, 2002, 209: 169-184.
- [12] 于海燕,周斌,胡尊英,等. 生物监测中叶绿素 a 浓度与藻类密度的关联性研究[J]. *中国环境监测*, 2009, 25(6): 40-43.
- [13] WANG Z C, LI G W, LI G B, et al. The decline process and major pathways of *Microcystis* bloom in Taihu Lake, China[J]. *Chinese journal of oceanology and limnology*, 2012, 30(1): 37-46.
- [14] 李金,董巧香,杜虹,等. 柘林湾表层沉积物中氮和磷的时空分布[J]. *热带海洋学报*, 2004, 23(4): 63-71.
- [15] 陈聚法,赵俊,孙耀,等. 桑沟湾贝类养殖水域沉积物再悬浮的动力机制及其对水体中营养盐的影响[J]. *海洋水产研究*, 2007, 28(3): 105-111.
- [16] 郎宇鹏,朱琳,刘春光,等. 鲢鱼对淡水浮游植物的抑制作用研究[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(S2): 683-686.
- [17] 费志良,吴军,赵钦,等. 三角帆蚌对藻类滤食及消化的研究[J]. *淡水渔业*, 2006, 36(5): 24-27.
- [18] 林文周,李莹莹. 人工湿地在水体富营养化治理中的应用[J]. *环境保护工程*, 2012, 30(4): 98-100.
- [19] 李旭东,周琪,张荣社,等. 三种人工湿地脱氮除磷效果比较研究[J]. *地学前缘*, 2005, 12(S1): 73-76.
- [20] 侯长定,柯凡,侯易辰. 复合人工湿地净化抚仙湖入湖河水的效果研究[J]. *生态科学*, 2015, 34(5): 99-104.

(上接第 63 页)

- 化效率研究[C]//2016 全国水环境污染控制与生态修复技术高级研讨会论文集. 北京:[出版者不详], 2016: 239-243.
- [12] 张佳琳,林方敏,罗勇,等. 厌氧-人工湿地:氧化塘用于华南农村污水连片整治[J]. *中国给水排水*, 2016, 32(12): 106-109.
- [13] 王翔宇. 安徽省农村生活污水典型处理工艺试验研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2015.